

논문 2004-41SP-2-3

# 기준 백색 선택에 따른 비디오 카메라의 전달 특성

## (Video Camera Characterization with White Balance)

김 은 수\*, 박 종 선\*\*, 장 수 옥\*\*\*, 한 찬 호\*, 송 규 익\*

(Eun-Su Kim, Jong-Sun Park, Soo-Wook Jang, Chan-Ho Han, and Kyu-Ik Sohng)

### 요 약

일반적으로 이미지를 획득하기 위한 도구로 사용되고 있는 비디오 카메라는 동일한 피사체의 XYZ 3 자극치에 대한 RGB 출력 신호가 카메라마다 각각 다른 기기 의존적인 특성을 가진다. 카메라로 촬영한 원 피사체의 XYZ 3 자극치와 카메라 RGB 출력 신호 사이의 변환 관계인 카메라 전달 특성을 알 수 있다면 다양한 디스플레이 시스템에서의 기기 독립적 색 재현이 가능하다. 카메라 전달 특성 조사 방법에 대한 연구는 두 가지 형태로 나뉘어서 진행되어 왔다. 첫 번째 방법은 카메라의 RGB 필터 분광 특성을 파장별로 구하여 CIE 칼러 매칭 함수로 표현하는 것과 알고 있는 색 타겟, 즉 샘플색의 XYZ 3 자극치를 카메라로 촬영하고 출력되는 RGB 신호 간의 변환 행렬을 구하는 방법이다. 실험이 용이하여 일반적으로 많이 이용되는 두 번째 방법은 동일한 카메라에 대해서도 촬영 조건에 따라 매번 60개 이상의 시험색을 촬영하여야 하는 번거로움이 있다. 본 논문에서는 특정 촬영 조건 하에서 구한 카메라 전달 특성 변환 행렬을 이용하여, 촬영 조건이 바뀌었을 때 달라지는 카메라의 전달 특성을 추정하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 먼저 다항식 모델링을 이용하여 특정 화이트 밸런스에서의 카메라 전달 특성 3×3 변환 행렬을 구하고, 이 변환 행렬로부터 카메라의 인광체 좌표를 추정한다. 마지막으로 구하고자 하는 기준 백색에 따른 카메라의 채널 이득을 계산하여 특정 기준 백색에 화이트 밸런스가 맞춰진 카메라의 전달 특성을 구하였다. 실험 결과 제안한 방법에 의해 구한 카메라의 전달 특성은 기존의 방법으로 구한 3×3 변환 행렬보다 더 좋은 성능을 가지며, 카메라의 화이트 밸런스가 달라질 때 마다 모든 시험색을 촬영하여 구해야 하는 기존의 변환 행렬과 비슷한 성능을 가지는 3×3 변환 행렬을 손쉽게 간단하게 구할 수 있다.

### Abstract

Video camera can be a useful tool to capture images for use in colorimeter. However the RGB signals generated by different video camera are not equal for the same scene. The video camera for use in colorimeter is characterized based on the CIE standard colorimetric observer. One method of deriving a colorimetric characterization matrix between camera RGB output signals and CIE XYZ tristimulus values is least squares polynomial modeling. However it needs tedious experiments to obtain camera transfer matrix under various white balance point for the same camera. In this paper, a new method to obtain camera transfer matrix under different white balance by using 3×3 camera transfer matrix under a certain white balance point is proposed. According to the proposed method, camera transfer matrix under any other white balance could be obtained by using colorimetric coordinates of phosphor derived from 3×3 linear transfer matrix under the certain white balance point. In experimental results, it is demonstrated that proposed method allow 3×3 linear transfer matrix under any other white balance having a reasonable degree of accuracy compared with the transfer matrix obtained by experiments.

**Keywords :** Camera characterization, Camera transfer matrix, Camera calibration, Device characterization

### I. 서 론

일반적으로 카메라는 동일한 XYZ 3 자극치에 대한 RGB 출력 신호가 카메라마다 각각 다른 기기 의존적인 특성을 가진다. 그러나 카메라의 RGB 출력 신호로부터 원래의 XYZ 3 자극치의 변환 관계를 알 수 있다면 다양한 디스플레이 시스템에서의 기기 독립적 색 재현(device-independent color reproduction)이 가능하다.

\* 정희원, 경북대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronics Engineering Kyungpook University)  
\*\* 정희원, LG전자 디지털영상사업부 영상제품연구소  
(DND Display Product Research, LG Electronics Inc.)  
\*\*\* 학생회원, 경북대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronics Engineering Kyungpook University)  
접수일자: 2003년9월3일, 수정완료일: 2004년3월1일

카메라로 촬영한 원 피사체의 XYZ 3 자극치와 카메라 RGB 출력 신호 사이의 변환 관계를 카메라 전달 특성 (camera characterization)이라고 한다.<sup>[1]</sup> 카메라 전달 특성 조사 방법에 대한 연구는 다음의 두 가지 형태로 나뉘어서 진행되어 왔다. 하나는 카메라의 RGB 필터 분광 특성을 파장별로 구하여 CIE 칼라 매칭 함수 (CIE color matching function, CMF)로 표현하는 것이다. 이것은 매우 까다로운 실험 과정을 요구한다. 다른 하나는 알고 있는 색 타겟, 즉 샘플색의 XYZ 3 자극치를 카메라로 촬영하고 출력되는 RGB 신호 간의 변환 행렬을 구하는 방법이다. 실험이 용이하여 일반적으로 많이 이용되는 후자의 방법에는 60개 이상의 시험색을 이용하여 다항 회귀법 (polynomial regression)을 적용해서 구하는 2차의 비선형 다항식 모델링이 효과적이라고 알려져 있다.<sup>[1]</sup> 그러나 카메라에 대한 전달 특성은 고정된 값을 가지지 않는다. 즉, 카메라의 촬영 조건인 화이트 밸런스 (white balance)에 따라서 카메라의 전달 특성을 나타내는 변환 행렬은 각각 다른 값을 가진다. 그러므로 동일한 카메라에 대해서도 촬영 조건에 따른 각각의 변환 행렬을 다항식 모델링 방법을 이용하여 구한다면 매번 60개 이상의 시험색을 촬영해야 하는 번거로움이 있다.

본 논문에서는 특정 촬영 조건 하에서 구한 카메라 변환 행렬을 이용하여, 촬영 조건이 바뀌었을 때 달라진 카메라 변환 행렬을 추정하는 방법을 제안하였다. 제안 방법에서는 먼저 다항식 모델링 (polynomial modeling)을 이용하여 특정 화이트 밸런스에서의 카메라 변환 행렬을 구하였다. 그리고 카메라의 화이트 밸런스는 RGB 각 채널 이득만을 변화시켜 조정한다는 사실에 착안하여 상기 변환 행렬로부터 카메라의 표준 인광체 좌표를 추정하도록 하였다. 마지막으로 특정 화이트 밸런스에 해당하는 채널 이득을 계산하여 화이트 밸런스에 따른 카메라의 변환 행렬을 구하였다.

실험 결과 각각의 화이트 밸런스 상태에서 실험을 통해 구한 카메라 변환 행렬과 제안한 방법으로 추정한 변환 행렬은 실용적으로 문제가 되지 않을 정도의 매우 작은 오차를 가짐을 확인하였다. 따라서 화이트 밸런스가 달라질 때 마다 카메라의 변환 행렬을 실험적으로 구하는 번거로움 없이, 카메라의 특정 화이트 밸런스에 대한 변환 행렬을 구함으로써 화이트 밸런스가 달라졌을 경우의 변환 행렬을 추정할 수 있다.

## II. 카메라 촬상 특성 이론

### 2.1 색 좌표계 이론

광원으로부터 나온 빛은 직접 혹은 피사체에 반사되어 사람 눈의 망막 (retina)에 분포된 시세포를 자극하게 되고, 이 자극이 시신경을 통해 뇌에 전달되어 밝기 (brightness), 색상 (hue), 및 색농도 (saturation)를 느끼게 된다. 빛의 물리적인 양을 파장 혹은 주파수의 함수로서 나타낼 수 있으며, 이러한 빛의 자극치를 XYZ의 3 자극치로 나타내면

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} \rho(\lambda) E(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{\lambda} \rho(\lambda) E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{\lambda} \rho(\lambda) E(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

과 같이 주어진다. 여기서 비례상수 k는

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

로 정의하며, 완전반사물체 즉,  $\rho(\lambda)=1$ 인 피사체의 밝기를 100으로 보았을 때 반사율 (reflectivity)이 1보다 작은 다른 피사체에 대한 자극치의 상대적인 양을 정량화 하는 계수이다.<sup>[2],[3]</sup> 여기서  $\rho(\lambda)$  및  $E(\lambda)$ 는 각각 피사체의 반사율 및 광원의 스펙트럼 분포를 나타낸다. 그리고  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ , 및  $\bar{z}(\lambda)$ 는 CIE에서 표준 관찰자에 대해 단색광을 이용한 실험에 의해 통계적으로 구해진 색에 대한 칼라 매칭을 나타낸다. 특히  $\bar{y}(\lambda)$ 는 밝기에 대한 비시감도 특성과 일치시킴으로써 Y 자극치는 빛의 휘도에 대한 정보를 가진다.

CIE xy 색 좌표계에서 임의의 색 자극 XYZ에 대한 좌표 x, y, 및 z는 각각

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (3)$$

로 주어진다. 여기서 x, y, 및 z 세 값의 합은 항상 1이므로 두 개의 좌표 값만 알면 나머지 하나의 좌표 값을 계산하여 얻을 수 있다.<sup>[2],[3]</sup>

한편 xy 좌표계에서는 시각으로 느끼는 색차 (color difference)와 xy 좌표상의 색차가 좌표상의 위치에 따라 균일하게 분포하지 않는다. 그러므로 좌표상의 색차와 시각상의 색차 간의 비균일성 (visual nonuniformity)을 줄인 UCS (uniform chromaticity scale) 좌표계를 사용한다. UCS 좌표계에는 1960년의 CIE uv 좌표계

$$u = \frac{4X}{X+15Y+3Z} = \frac{4x}{-2x+12y+3}$$

$$v = \frac{6Y}{X+15Y+3Z} = \frac{6y}{-2x+12y+3}$$
(4)

와  $uv$  좌표계의  $v$ 축을 1.5배 늘여서 균일성을 더욱 향상시킨 1976년의 CIE  $u'v'$  좌표계는

$$u' = u = \frac{4X}{X+15Y+3Z} = \frac{4x}{-2x+12y+3}$$

$$v' = 1.5v = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} = \frac{9y}{-2x+12y+3}$$
(5)

로 주어진다. 그러나  $uv$  또는  $u'v'$  좌표계는 밝기 정보를 나타낼 수 없다. 특히 서로 다른 두 색을 비교 하고자 할 때 시각적으로 느끼는 색차와 수치적인 차이가 선형적으로 비례해야 하므로 좀 더 균일한 공간 좌표계가 요구된다. 이러한 좌표계로는 1964년 CIE  $U^*V^*W^*$  좌표계, 1976년 CIE  $L^*u^*v^*$  (CIELUV) 좌표계, 1976년 CIE  $L^*a^*b^*$  (CIELAB) 좌표계 등이 있다.<sup>[2]-[4]</sup>

CIE  $U^*V^*W^*$  좌표계는 1964년 CIE  $uv$  좌표계의 확장으로 추천된 3차원적인 직각 좌표계로서

$$U^* = 13W^*(u - u_n)$$

$$V^* = 13W^*(v - v_n)$$

$$W^* = 25Y^{1/3} - 17$$
(6)

과 같이 주어진다. 여기서  $u_n$  및  $v_n$  은 각각 기준 백색에 대한  $u$  및  $v$  좌표 값이다. 이 좌표계에서 두 점 ( $W^*, U^*, V^*$ ) 와 ( $W^* + \Delta W^*, U^* + \Delta U^*, W^* + \Delta W^*$ ) 사이의 거리, 즉 대응 자극치들 사이의 감지 크기에 대한 척도인 색차  $\Delta E_{CIE64}$  는 다음 식에서와 같이 정의된다.

$$\Delta E_{CIE64} = [(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2]^{1/2}$$
(7)

CIELUV 좌표계는 1976년  $U^*V^*W^*$  좌표계에서  $V^*$  의 크기를 50 % 확장하면 시각적 판단과 더욱 일치한다는 사실에 입각하여 개발된 좌표계로서 다음으로 주어진다.

$$L^* = \begin{cases} 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 & \text{for } Y/Y_n > 0.008856 \\ 903.3(Y/Y_n) & \text{for } Y/Y_n \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n)$$
(8)

여기서  $Y_n$ ,  $u'_n$ , 및  $v'_n$  는 각각 기준 백색에 대한  $Y$ ,  $u'$ , 및  $v'$  좌표 값이며,  $Y_n = 100$  일 때  $L^*$  는  $W^*$  와 거의 일치한다. 또 CIELUV 좌표계에서의 색차  $\Delta E_{uv}^*$  는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta E_{uv}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2}$$
(9)

## 2.2 비디오 카메라에서 색 자극치 XYZ와 RGB 신호의 변환 관계

카메라에 있어서 원 피사체의 색 자극치 XYZ로부터 카메라의 RGB 신호를 구하기 위해서는 카메라에 적용될 표준 모니터의 인광체 및 기준백색의 좌표 값이 필요하며, 비디오 카메라에서 색 자극치 XYZ로부터 RGB 신호로 변환하기 위한 변환 행렬을 구하는 과정은 다음과 같다.<sup>[3],[5]</sup>

우선 식 (3)의 분모인 3 자극치의 합을

$$T = X + Y + Z$$
(10)

로 두면,  $xy$  좌표와 각 자극치의 관계는

$$X = xT, \quad Y = yT, \quad Z = zT$$
(11)

로 주어진다. 따라서 **R**, **G**, 및 **B** 인광체 각각의 자극치에 대한 3 자극치 XYZ는 각각

$$X = X_{Rc} + X_{Gc} + X_{Bc}$$

$$Y = Y_{Rc} + Y_{Gc} + Y_{Bc}$$

$$Z = Z_{Rc} + Z_{Gc} + Z_{Bc}$$
(12)

로 된다. 여기서  $X_{Rc}$ ,  $Y_{Rc}$ , 및  $Z_{Rc}$  는 각각 **R** 인광체의 3 자극치 XYZ를 나타내며, **G** 및 **B** 인광체에 대해서도 마찬가지이다. 식 (11)을 식 (12)에 대입하면

$$X = x_{Rc}T_{Rc} + x_{Gc}T_{Gc} + x_{Bc}T_{Bc}$$

$$Y = y_{Rc}T_{Rc} + y_{Gc}T_{Gc} + y_{Bc}T_{Bc}$$

$$Z = z_{Rc}T_{Rc} + z_{Gc}T_{Gc} + z_{Bc}T_{Bc}$$
(13)

과 같이 된다. 여기서  $x_{Rc}$ ,  $y_{Rc}$ , 및  $z_{Rc}$  는 각각 **R** 인광체의 좌표를 나타내며, **G** 및 **B** 인광체에 대해서도 마찬가지이다. 한편 **R**, **G**, 및 **B** 각 인광체의 3 자극치의 합  $T_{Rc}$ ,  $T_{Gc}$ , 및  $T_{Bc}$  는 각 채널 이득  $K_{Rc}$ ,  $K_{Gc}$ , 및  $K_{Bc}$  와 RGB 자극치에 비례하므로 다음과 같다.

$$T_{Rc} = X_{Rc} + Y_{Rc} + Z_{Rc} = K_{Rc}R$$

$$T_{Gc} = X_{Gc} + Y_{Gc} + Z_{Gc} = K_{Gc}G$$

$$T_{Bc} = X_{Bc} + Y_{Bc} + Z_{Bc} = K_{Bc}B$$
(14)

이를 식 (13)에 대입하면 RGB 자극치와 XYZ 자극치와의 관계는

$$X = x_{Rc}K_{Rc}R + x_{Gc}K_{Gc}G + x_{Bc}K_{Bc}B$$

$$Y = y_{Rc}K_{Rc}R + y_{Gc}K_{Gc}G + y_{Bc}K_{Bc}B$$

$$Z = z_{Rc}K_{Rc}R + z_{Gc}K_{Gc}G + z_{Bc}K_{Bc}B$$
(15)

와 같이 된다. 카메라에서는 화이트 밸런스를 조정하기 위해서 각 채널 이득  $K_{Rc}$ ,  $K_{Gc}$ , 및  $K_{Bc}$  를 기준 백색의 자극치가  $X_w$ ,  $Y_w$ , 및  $Z_w$  일때  $R=G=B=1$ 이 되도록

조정한다. 따라서 식 (15)에서 자극치  $R=G=B=1$  일 때  $Y_W=1$ 로 정규화 하면

$$\begin{aligned} X_W &= \frac{x_W}{y_W} = x_{Rc}K_{Rc} + x_{Gc}K_{Gc} + x_{Bc}K_{Bc} \\ Y_W &= 1 = y_{Rc}K_{Rc} + y_{Gc}K_{Gc} + y_{Bc}K_{Bc} \\ Z_W &= \frac{z_W}{y_W} = z_{Rc}K_{Rc} + z_{Gc}K_{Gc} + z_{Bc}K_{Bc} \end{aligned} \quad (16)$$

로 주어진다. 이를 행렬 형태로 나타내면

$$\begin{bmatrix} X_W/Y_W \\ 1 \\ Z_W/Y_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Rc} & x_{Gc} & x_{Bc} \\ y_{Rc} & y_{Gc} & y_{Bc} \\ z_{Rc} & z_{Gc} & z_{Bc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{Rc} \\ K_{Gc} \\ K_{Bc} \end{bmatrix} \quad (17)$$

이다. 따라서 카메라에서의 **R**, **G**, 및 **B** 채널의 각 채널 이득  $K_{Rc}$ ,  $K_{Gc}$ , 및  $K_{Bc}$ 는 식 (17)로부터 구해지며 이를 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{Rc} \\ K_{Gc} \\ K_{Bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{y_W} \begin{bmatrix} x_{Rc} & x_{Gc} & x_{Bc} \\ y_{Rc} & y_{Gc} & y_{Bc} \\ z_{Rc} & z_{Gc} & z_{Bc} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} \quad (18)$$

식 (18)에서 채널 이득은 모니터에서 사용될 인광체 및 기준 백색  $xy$  좌표값으로부터 구할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 식 (15)를 행렬 형태로 나타내면

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Rc} & x_{Gc} & x_{Bc} \\ y_{Rc} & y_{Gc} & y_{Bc} \\ z_{Rc} & z_{Gc} & z_{Bc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{Rc} & 0 & 0 \\ 0 & K_{Gc} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Bc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (19)$$

와 같다. 식 (19)의 역행렬을 구하여 NTSC 표준 모니터 인광체 좌표와 기준 백색으로 C광원의 좌표를 대입함으로써 임의의 색 자극치  $XYZ$ 에 대한  $RGB$  신호로의 변환 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.9097 & -0.5324 & -0.2882 \\ -0.9850 & 1.9998 & -0.0283 \\ 0.0582 & -0.1182 & 0.8976 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (20)$$

상기 식 (20)의 변환 행렬을 단일 스펙트럼 함수로 나타내면 이상적인 카메라 촬상 특성을 얻을 수 있다. 식 (20)의 변환 행렬을 이용해서 구한 이상적인 NTSC 칼러 카메라의 촬상 특성을 그림 1에 나타내었다. 그림에서 분광적인 촬상 특성에 음의 영역이 존재함을 알 수 있다. 그러나 실제 카메라에서 광학적 필터로는 음의 영역에 대한 특성을 나타낼 수 없다. 따라서 실제의 카메라에서는 회로적으로 양의 영역을 적절히 조절함으로써 음의 영역의 손실을 보상하는 방법과, 양의 영역만으로 얻어진 전압 신호에 대하여 선형 행렬 변환을 통하여 보상하는 방법 등을 채용하고 있다.<sup>[6]</sup>

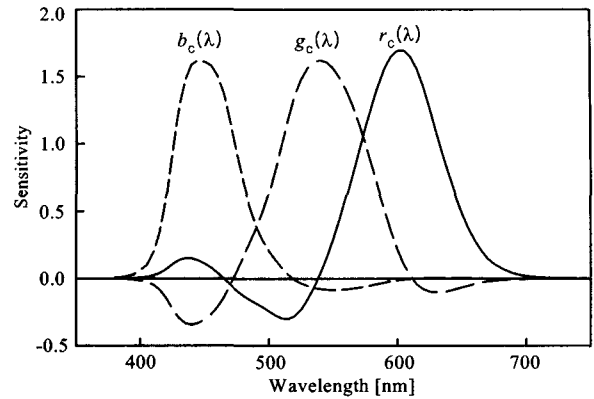


그림 1. 이상적인 NTSC 카메라의 촬상 특성  
Fig. 1. Ideal camera • spectral sensitivities for NTSC phosphor primaries and illuminant C.

### III. 카메라 전달 특성 조사

#### 3.1 기존의 카메라 전달 특성 조사 방법

카메라 특성을 조사하는 방법은 크게 분광 분포를 기초로 한 방법 (spectral sensitivity based method) 과 색 타겟을 기초로 한 방법 (color target based method) 으로 분류된다.<sup>[1]</sup>

분광 분포를 기초로 한 카메라 특성 조사 방법에서는 카메라의 분광 분포와 CIE 칼러 매칭 함수와의 관계를 구함으로써 색 자극치  $XYZ$ 와 카메라 출력  $RGB$  신호와의 관계를 얻는다. 다음으로 측정된 카메라 **R**, **G**, 및 **B** 필터의 분광 분포와 CIE 칼러 매칭 함수와의 변환 관계를 얻음으로써 카메라 전달 특성을 알 수 있다. 그러나 이 방법에서는 카메라 **R**, **G**, 및 **B** 필터의 분광 분포를 측정할 수 있는 계측기, 예를 들면 모노크로미터 (monochrometer)나 방사 측정기 (radiance meter) 등과 같은 비교적 고가의 장비가 필요하고 까다로운 실험이 요구되는 단점이 있다.

색 타겟을 기초로 한 방법에서는 임의의 시험색의 자극치  $XYZ$ 와 이를 촬영한 카메라 출력 전압  $RGB$  값과의 변환 행렬을 구한다. 이를 구하는 방법에는 내삽과 외삽을 이용한 3차원 LUT (look-up tables) 방법<sup>[7],[8]</sup>, 최소 제곱 다항식 모델링 (least squares polynomial modeling) 방법<sup>[9]</sup>, 그리고 신경망 방법<sup>[10]</sup> 등이 이용된다. 이 중 다항 회귀법을 이용한 최소 제곱 다항식 모델링은 시험색의 3 자극치  $XYZ$ 와 카메라 출력  $RGB$  값만을 이용하여 간단하게 전달 특성을 구할 수 있어 일반적으로 널리 사용된다. 이 모델링 방법에서 다항식은

1차 선형 다항식에서 2차나 3차 등의 비선형 다항식으로 확장 가능하며, 그 중 1차 선형 다항식의 형태로 변환 행렬을 구하는 방법은 다음과 같다.

$N$ 개의 시험색의 3 자극치  $XYZ$ 로 만든  $3 \times N$  행렬과 이에 대응하는 카메라 출력  $RGB$  값으로 구성된  $3 \times N$  행렬 사이의 변환 행렬은

$$\begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \Lambda & X_N \\ Y_1 & Y_2 & \Lambda & Y_N \\ Z_1 & Z_2 & \Lambda & Z_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & \Lambda & R_N \\ G_1 & G_2 & \Lambda & G_N \\ B_1 & B_2 & \Lambda & B_N \end{bmatrix} \quad (21)$$

이 된다. 식 (21)에서 좌변 첫 행만 구하면

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}R_1 + a_{12}G_1 + a_{13}B_1 \\ X_2 &= a_{11}R_2 + a_{12}G_2 + a_{13}B_2 \\ &\text{M} \quad \text{M} \quad \text{M} \quad \text{M} \\ X_N &= a_{11}R_N + a_{12}G_N + a_{13}B_N \end{aligned} \quad (22)$$

와 같고, 이를 행렬 형태로 다시 표현하면

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \text{M} \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ R_N & G_N & B_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{bmatrix} \quad (23)$$

이 된다. 식 (23)은 방정식의 수가 많고 미지수의 수가 적은 경우이므로 최소 평균 해 (least-mean solution)를 구하기 위해서 일반화된 역행렬 (generalized inverse matrix) 방법을 이용하여 미지수  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ , 그리고  $a_{13}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{bmatrix} = \left[ \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ R_N & G_N & B_N \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ R_N & G_N & B_N \end{bmatrix} \right]^{-1} \times \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ R_N & G_N & B_N \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \text{M} \\ X_N \end{bmatrix} \quad (24)$$

식 (24)와 유사한 방법으로 나머지 미지수를 찾아 카메라 변환 행렬 전체를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ R_N & G_N & B_N \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ R_N & G_N & B_N \end{bmatrix} \right\}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ R_N & G_N & B_N \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ X_N & Y_N & Z_N \end{bmatrix} \right\}^T \quad (25)$$

식 (25)에서 구한 카메라 변환 행렬은 카메라 출력  $R$ ,  $G$ , 및  $B$  의 3 가지 값만으로 1차 선형 다항식을 구성하여 구한  $3 \times 3$  형태의 1차 선형 변환 행렬이다. 여기에  $R^2$ ,  $G^2$ ,  $B^2$ , 그리고 1 등의 2차항 또는 상수항을 더하여 2차 이상의 비선형 다항식으로 확장하면  $3 \times 4$ ,  $3 \times 5$ , 또는  $3 \times 11$  행렬 등의 여러 가지 형태의 변환 행렬을 얻을 수 있다.

Hong<sup>[1]</sup> 등은 다항 회귀법을 이용한 최소 제곱 다항식 모델링으로 카메라 전달 특성을 조사하였다. 그는 264개의 서로 다른 색으로 이루어진 ANSI IT8.7/2 차트<sup>[11]</sup>와 The Professional Colour Communicator (PCC)<sup>[12]</sup>의 색 샘플 2095개를 이용하여 각각의 3 자극치  $XYZ$ 와 그에 대한 카메라 출력  $RGB$  값을 얻었다. 이  $RGB$  값을 1차 선형 다항식에서부터 2차 비선형 다항식으로 확장하면서 각각의 변환 행렬을 구하여 성능을 비교하였다. 그 결과 확장된 2차 비선형 다항식으로 구한  $3 \times 11$  행렬의 성능이 우수함을 보였다. 또한 실제의 카메라 전달 특성 조사에서는 시험색을 60개 이상 이용하는 것으로도 만족할 수준의 변환 행렬을 얻을 수 있다고 하였다.

그러나 앞서 언급했듯이 카메라의 전달 특성을 구할 때 마다, 또는 동일한 카메라에서도 촬영 조건, 즉 화이트 밸런스가 바뀔 때 마다 60개 이상이라는 많은 수의 시험색을 이용하여 변환 행렬을 구해야 하는 번거로움이 있다. 또한 이용되는 시험색은 색 좌표상에서 카메라가 표현할 수 있는 전 색역에 고루 퍼져 있어야 하며, 시험색으로 사용한 색 좌표값 범위를 넘어서는 색에 대해서  $3 \times 11$  행렬은 큰 오차를 갖는다. 따라서 실용적인 카메라 전달 특성을 구하기 위한 간편하고 유연한 방법이 요구된다.

### 3.2 화이트 밸런스를 고려한 카메라 전달 특성 조사 방법 제안

본 논문에서는 최소 제곱 다항식 모델링을 이용하여 특정 화이트 밸런스 상태의 카메라 전달 특성을 1차 선형  $3 \times 3$  변환 행렬 형태로 구한 다음 카메라의 화이트 밸런스가 변했을 경우의 전달 특성 변환 행렬을 추정하는 방법을 제안한다.

카메라 전달 특성은 식 (19)에서와 같이 카메라의 표준 인광체 좌표와 기준 백색에 따라 결정된다. 여기서

화이트 밸런스가 달라짐에 따라 바뀌는 값은  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$ , 및  $\mathbf{B}$ 의 각 채널 이득  $K_{Rc}$ ,  $K_{Gc}$ , 및  $K_{Bc}$ 이다. 따라서 전달 특성을 구하고자 하는 카메라의 표준 인광체 좌표를 안다면 화이트 밸런스에 따른 카메라 변환 행렬은 화이트 밸런스가 맞춰진 기준 백색의 좌표로부터  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$ , 및  $\mathbf{B}$ 의 채널 이득만을 계산함으로써 얻을 수 있다.

특정 기준 백색에 화이트 밸런스가 맞춰진 카메라로 실험을 통해 최소 제곱 다항식 모델링을 이용하여 1차 선형  $3 \times 3$  변환 행렬 형태로 전달 특성 행렬을 구하면 식 (25)와 같다. 실험으로 구한 변환 행렬이 이론상의 카메라 전달 특성 행렬과 같다고 가정하면, 식 (19)와 식 (25)로부터 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Rc} & x_{Gc} & x_{Bc} \\ y_{Rc} & y_{Gc} & y_{Bc} \\ z_{Rc} & z_{Gc} & z_{Bc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{Rc} & 0 & 0 \\ 0 & K_{Gc} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Bc} \end{bmatrix} \quad (26)$$

이때 식 (26)에서 카메라의 특정 기준 백색을  $D_{65}$  광이라 하였을 때를 다음과 같이 표기한다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}_{D_{65}} = \begin{bmatrix} x_{Rc} & x_{Gc} & x_{Bc} \\ y_{Rc} & y_{Gc} & y_{Bc} \\ z_{Rc} & z_{Gc} & z_{Bc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{Rc} & 0 & 0 \\ 0 & K_{Gc} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Bc} \end{bmatrix}_{D_{65}} \quad (27)$$

여기서 아래 첨자  $D_{65}$ 는  $D_{65}$ 의 광에 화이트 밸런스가 된 카메라 변환 행렬과 채널 이득임을 의미한다. 따라서  $D_{65}$ 의 광에 화이트 밸런스가 맞춰진 카메라를 이용한 실험을 통해 구한 변환 행렬로부터 표준 인광체 좌표 행렬을 구할 수 있다면, 동일한 카메라가 A의 광에 밸런스 된 경우의 변환 행렬은 식 (18)에 의해 기준 백색이 A의 광 일 때 채널 이득을 계산함으로써 다음과 같이 추정 가능하다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}_{Ac} = \begin{bmatrix} x_{Rc} & x_{Gc} & x_{Bc} \\ y_{Rc} & y_{Gc} & y_{Bc} \\ z_{Rc} & z_{Gc} & z_{Bc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{Rc} & 0 & 0 \\ 0 & K_{Gc} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Bc} \end{bmatrix}_A \quad (28)$$

여기서 아래 첨자 e는 추정된 행렬임을 의미한다.

본 논문에서 제안한 방법은 표준 기준 백색인  $D_{65}$ 의 광에 화이트 밸런스가 맞춰진 카메라의 전달 특성 변환 행렬로부터 표준 인광체 좌표 행렬을 구하고, 카메라의 기준 백색이 A의 광으로 바뀌었을 때, 그 때의 채널 이득을 계산함으로써 변화된 A의 광에 화이트 밸런스가 된 카메라 전달 특성을 추정할 수 있다. 이와 같은 방법을 이용하면 특정 화이트 밸런스 상태의 카메라 변환 행렬로부터 화이트 밸런스가 달라질 경우의 카메라 변환 행렬을 손쉽게 구해낼 수가 있다.

제안한 방법으로 카메라 전달 특성을 구하기 위해서

는, 우선 특정 화이트 밸런스 상태의 카메라 변환 행렬로부터 인광체 좌표와 채널 이득을 구해야 한다. 이를 구하는 방법은 다음과 같다.  $\mathbf{R}$  인광체의 좌표를 얻기 위해 식 (15)에  $R$ 은 1,  $G$ 와  $B$ 는 0을 대입하면

$$X = x_R K_{Rc}, \quad Y = y_R K_{Rc}, \quad Z = z_R K_{Rc} \quad (29)$$

이고, 색 좌표를 구하기 위해 자극치의 합을 구하면

$$\begin{aligned} T &= X + Y + Z = x_R K_{Rc} + y_R K_{Rc} + z_R K_{Rc} \\ &= (x_R + y_R + z_R) K_{Rc} = K_{Rc} \end{aligned} \quad (30)$$

이 된다. 따라서 식 (29)와 식 (30)을 이용하여  $\mathbf{R}$  인광체의 색 좌표를 구하면 다음과 같다.

$$x = \frac{X}{T} = x_R, \quad y = \frac{Y}{T} = y_R, \quad z = \frac{Z}{T} = z_R \quad (31)$$

같은 방법으로  $\mathbf{G}$  및  $\mathbf{B}$  인광체 좌표를 구할 수 있다. 따라서 제안한 카메라 변환 행렬로부터 인광체 좌표를 구하는 상기의 방법과 동일한 절차를 식 (25)와 같이 실험을 통해 구한  $3 \times 3$  변환 행렬에 적용하면, 전달 특성을 구하고자 하는 카메라의 인광체 좌표를 구할 수 있다.

다음으로 기준 백색을 구하는 방법은 카메라 전달 특성 식의  $RGB$  값에 1을 입력하는 것이다. 여기서 1은 카메라 출력  $RGB$  값의 최대값으로 정규화한 것이다. 이를 수식적으로 확인하기 위해 우선 식 (19)의  $R$ ,  $G$  그리고  $B$ 에 1을 입력하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{Rc} \\ K_{Gc} \\ K_{Bc} \end{bmatrix} \quad (32)$$

식 (32)에 식 (18)에서 정의된 채널 이득  $K_{Rc}$ ,  $K_{Gc}$ , 및  $K_{Bc}$ 를 대입하면

$$X = \frac{x_W}{y_W}, \quad Y = 1 = \frac{y_W}{y_W}, \quad Z = \frac{z_W}{y_W} \quad (33)$$

이 된다. 색 좌표를 구하기 위해 자극치의 합을 구하면 다음과 같다.

$$T = X + Y + Z = \frac{x_W}{y_W} + \frac{y_W}{y_W} + \frac{z_W}{y_W} = \frac{1}{y_W} \quad (34)$$

식 (33)과 식 (34)를 이용하여 색 좌표를 구하면

$$x = \frac{X}{T} = x_W, \quad y = \frac{Y}{T} = y_W, \quad z = \frac{Z}{T} = z_W \quad (35)$$

와 같이 주어지며, 이는 기준 백색의 좌표가 된다. 따라서 카메라 변환 행렬로부터 기준 백색을 구하는 상기의 방법과 동일한 절차를 식 (25)에서 구한  $3 \times 3$  변환 행렬에 적용하여 기준 백색 좌표를 구한다.

#### IV. 실험 결과 및 고찰

제안한 방법의 성능을 평가하기 위해 본 논문에서는 4가지의 다른 기준 백색에 대해 실험을 수행하였다. 먼저 각 기준 백색에 화이트 밸런스 된 카메라로 실험을 통해 1차 선형 3×3 변환 행렬을 구하였다. 여기서는 3가지 시험색만을 이용하여 구한 행렬과 식 (25)와 같이 모든 시험색을 이용하여 일반화된 역행렬 방법으로 구한 3×3 행렬, 이렇게 두 가지 방법으로 구한 각각의 3×3 변환 행렬에 대해 제안 방법을 적용하였다. 다음으로 특정 기준 백색에 밸런스 된 카메라의 3×3 변환 행렬로부터 표준 인광체 좌표를 구하여 나머지 3가지 기준 백색에 밸런스 된 카메라 변환 행렬을 추정하였다. 마지막으로 각 화이트 밸런스의 경우에 대하여 실험으로 구한 변환 행렬과 추정한 변환 행렬의 성능을 비교 분석하였다.

##### 4.1 실험을 위한 준비 사항

카메라 변환 행렬을 구하기 위하여 계측기로 XYZ 3차극치를 측정하고 카메라로 시험색을 촬영하기 위한 실험을 하기 전에 우선 계측기의 안정성, 시험색을 만들어 낼 모니터의 안정성, 카메라의 렌즈 특성, 그리고 카메라 감마 특성에 대해 조사했다.

실험에 사용될 color analyzer (Minolta CA100)는 실험 수행 1시간 전에 전원을 켜 놓음으로써 안정성을 유지할 수 있도록 한 다음 실험 수행 직전에 영점 조정을 하였다. 시험색을 대신할 색 패치 (patch)를 만들기 위해 이용될 모니터 (Sony G500)의 경우 인광체의 발광 특성이 안정되기 위한 시간을 측정하였다. 전 백색 화면을 모니터에 디스플레이하고 약 10분 간격으로 3시간 동안 좌표와 휘도값을 측정된 결과를 그림 2에 나타내었다. 이 그림으로부터 전원을 켜 뒤 1시간 후 인광체의 발광 특성이 안정적인 성능을 나타낼 수 있다.

카메라의 집광부인 카메라 렌즈의 광 투과 특성은 렌즈의 외곽으로 갈수록 나빠진다. 입사광이 렌즈 중심을 기준으로 이루는 각을  $\theta$ 라 할 때 렌즈 중심에 입사되는 광량  $E_o$ 와 일정  $\theta$ 의 위치에서 입사되는 광량  $E_i$ 와의 관계는

$$E_i = E_o \cos^4 \theta \tag{36}$$

로 주어진다.<sup>[13]</sup> 실험에 이용된 카메라 (Sony DVCAM DSR200)의 렌즈 특성을 조사하기 위해 일정 휘도값을 갖는 시험색을 카메라 렌즈 중앙에 위치시켜 촬영한 카메라 출력 신호 레벨과 카메라를 좌우로 평행 이동시키면서 동일한 시험색에 대한 카메라 출력 신호 레벨을 조사하였다. 실험 결과 구한 카메라 출력 신호 레벨을 표 1에 나타내었다. 여기서 카메라가 렌즈 중심을 기준으로 우측으로 평행 이동했을 때 시험색과 이루는 각을 '-'로 표현하였고 그 반대의 경우는 '+'로 표현하였다. 표 1에서 보듯이 동일한 시험색에 대한 좌우 60° 입사각에서의 카메라 출력 신호 레벨은 0° 입사각에서의 출력 신호 레벨과 약 1% 정도의 오차를 가짐을 알 수 있다. 따라서 실험에 이용된 카메라는 렌즈의  $\cos^4 \theta$  법칙에 대한 보상이 상당히 되어 있음을 확인할 수 있다. 그러나 본 실험에서는 렌즈 특성에 의한 영향을 더욱 줄이기 위해서 촬영한 영상의 중앙 위치를 기준으로 일정 간격 이내에 존재하는 각 픽셀의 RGB 값을 평균하였다.

마지막으로 실험에 이용된 카메라의 감마 특성은 2.2이므로 카메라의 출력 신호로부터 선형 RGB 값을 얻기 위해 역감마를 취하여 사용하였다.

표 1. 카메라의 렌즈 특성  
Table 1. Lens properties of camera.

Angle [degree]	-60	-30	0	+30	+60
Camera output signal level [IRE]	76.2	76.5	76.9	76.7	76.1

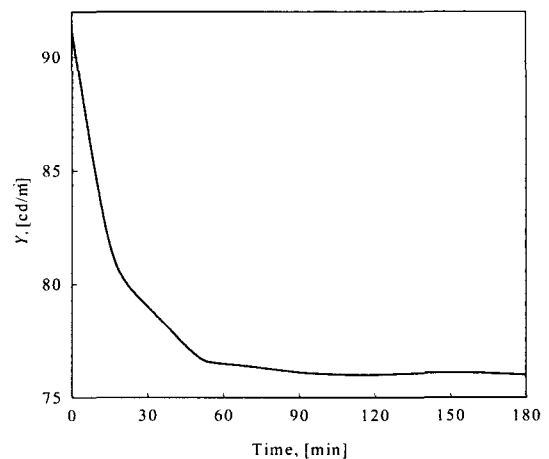


그림 2. 시간에 따른 모니터 인광체 발광 특성  
Fig. 2. Luminous property of monitor phosphor.

4.2 카메라 변환 행렬을 구하기 위한 실험 및 결과

화이트 밸런스 선택에 따른 카메라 전달 특성 조사를 위한 실험은 다음과 같이 진행하였다. 시험색 패치 (180×130 mm<sup>2</sup>)를 기준 광원 D<sub>65</sub>에 화이트 밸런스를 맞춘 모니터의 중앙에 디스플레이 하고 color analyzer로 각 패치의 xy 색좌표와 휘도를 측정한다. 이때 모든 패치에 대하여 색 좌표 측정 영역을 모니터의 중앙으로 일정하게 유지하였다. 촬영시 색 좌표를 측정한 영역이 카메라 렌즈 중심에 입력되도록 카메라를 고정 시킨다. 촬영 결과 얻은 영상에서 카메라 출력 RGB 값을 구할 때도 이 영역 내의 픽셀값을 평균한다.

촬영 특성을 조사할 대상 카메라의 화이트 밸런스를 기준 광원 D<sub>65</sub>에 맞춘 후 카메라의 출력 신호 레벨이 포화되지 않도록(80 IRE ~ 90 IRE) 셔터 속도와 조리개를 조절하여 고정한 뒤 패치를 촬영하였다. 다음에 카메라 화이트 밸런스를 기준 광원 5800 K, 3200 K, 및 A의 광에 맞추어 동일한 실험을 수행하였다. 시험색 패치는 Macbeth color chart의 주요색 11개와 모니터의 색재현 범위 영역 내에 고루 분포된 임의의 59개 색으로 구성되어 있다. 이들 중 일부를 표 2에 나타내었고, 실험을 위한 전체 구성도는 그림 3에서와 같다.

표 2. 실험에 이용된 시험색 패치  
Table 2. Test sample patch.

No. of test sample patch	x	y	Y
1	0.355	0.344	45.6
2	0.313	0.330	64.7
3	0.347	0.456	58.9
4	0.436	0.406	42.5
5	0.240	0.200	18.7
6	0.413	0.486	60.0
7	0.213	0.330	47.3
8	0.335	0.180	22.2
9	0.601	0.333	17.7
10	0.274	0.584	44.5
11	0.160	0.089	6.60
12	0.294	0.162	16.4
13	0.342	0.399	63.1
14	0.412	0.454	59.0
15	0.537	0.354	22.0
16	0.491	0.290	21.7
17	0.240	0.200	18.7
18	0.401	0.351	36.3
19	0.310	0.459	56.6
20	0.401	0.351	36.1

먼저 변환 행렬은 카메라 출력 RGB 값과 측정된 XYZ 값 중 red, green, 및 blue 3가지 색만 이용하여 구한 3×3 변환 행렬 (이하  $M_{RGB}$ )과 모든 색을 이용하여 일반화된 역행렬 방법으로 구한 3×3 변환 행렬(이하  $M_{GIM}$ )을 각각 구하였다. 그리고 5800 K, 3200 K, 그리고 A의 광을 기준 백색으로 화이트 밸런스 된 카메라에 대해서도 동일한 방법으로 두 가지 형태의 변환 행렬을 조사하였다. 이는 각각의 기준 백색에 밸런스 된 카메라의 변환 행렬과 제안한 방법으로 추정된 변환 행렬과의 성능을 비교하기 위함이다.

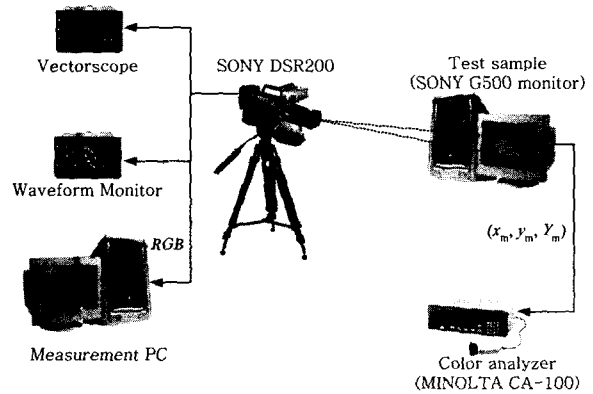


그림 3. 비디오 카메라 특성 조사 실험 구성도  
Fig. 3. Schematic diagram of video camera characterization.

표 3. 각 기준 백색에 대해 화이트 밸런스가 맞춰진 카메라 변환 행렬

Table 3. Camera transfer matrix under each reference white.

Reference white	$M_{RGB}$	$M_{GIM}$
D <sub>65</sub>	$\begin{bmatrix} 0.6135 & 0.2584 & 0.1748 \\ 0.3131 & 0.6915 & 0.0764 \\ 0.0306 & 0.1188 & 1.0330 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5750 & 0.2240 & 0.1663 \\ 0.2837 & 0.6589 & 0.0765 \\ 0.0088 & 0.1099 & 1.0046 \end{bmatrix}$
5800 K	$\begin{bmatrix} 0.7662 & 0.2550 & 0.1801 \\ 0.3906 & 0.6709 & 0.0774 \\ 0.0394 & 0.1156 & 1.0600 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.7633 & 0.2284 & 0.1630 \\ 0.3915 & 0.6594 & 0.0648 \\ 0.0452 & 0.1144 & 1.0345 \end{bmatrix}$
3200 K	$\begin{bmatrix} 1.4392 & 0.2946 & 0.1032 \\ 0.7361 & 0.7645 & 0.0469 \\ 0.0825 & 0.1110 & 0.6296 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.2577 & 0.2403 & 0.1578 \\ 0.6220 & 0.7181 & 0.0988 \\ 0.0283 & 0.0861 & 0.6483 \end{bmatrix}$
A	$\begin{bmatrix} 1.1718 & 0.2580 & 0.0652 \\ 0.5996 & 0.6938 & 0.0301 \\ 0.0592 & 0.0671 & 0.3832 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0148 & 0.2189 & 0.0925 \\ 0.4912 & 0.6663 & 0.0565 \\ -0.0120 & 0.0596 & 0.3898 \end{bmatrix}$

각 기준 백색 하에서의 카메라에 대해 두 가지 형태, 즉  $M_{RGB}$ 와  $M_{GIM}$ 으로 구해진 카메라 변환 행렬은 표 3과 같다. 여기서 두 가지 변환 행렬 값은 서로 같지 않



지만 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

다음으로 화이트 밸런스가  $D_{65}$ 의 광에 맞춰진 카메라를 이용하여 구한 두 행렬  $M_{RGB}$ 와  $M_{GIM}$ 에 대하여 제안한 방법을 적용하여 R, G, 및 B 인광체 좌표를 구하여 표 4에 나타내었다.

$M_{RGB}$ 로 구한 인광체 좌표를 이용하여 5800 K, 3200 K, 및 A의 광에 화이트 밸런스 된 카메라의 3x3 변환 행렬 (이하  $M_{RGB\_5800K}$ ,  $M_{RGB\_3200K}$ , 그리고  $M_{RGB\_A}$ )을 추정하기 위해 우선 각 기준 백색에 따라 변하는 채널 이득을 식 (18)을 이용하여 구하였다.

이상적인 경우 각각의 기준 백색에 화이트 밸런스 된 카메라로 휘도 값이 동일한 해당 기준 백색을 촬영했을 때, 카메라 출력 RGB 값은 기준 백색에 상관없이 모두 같아야 한다. 그러나 해당 기준 백색에 대해 화이트 밸런스 된 카메라로 같은 휘도 값을 갖는 기준 백색을 촬영하여 출력되는 RGB 값을 구한 결과 그 값들이 서로 다름을 알 수 있었다. 이는 실험에 사용된 카메라가 각각의 기준 백색에 대해 화이트 밸런스 될 때, RGB 값의 비는 1:1:1을 유지하지만 그 절대값은 각각 다르기 때문이다. 따라서 추정 변환 행렬을 구할 때 기준 백색에 따른 출력 RGB 값의 절대값 간의 비를 고려해야 한다. 실험 결과 얻어진 각각의 기준 백색에 화이트 밸

표 4. 제안한 방법으로 구한 인광체 좌표  
Table 4. Chromaticity coordinates of phosphor primaries obtained by proposed method.

	by $M_{RGB}$			by $M_{GIM}$		
	R	G	B	R	G	B
x	0.6410	0.2418	0.1361	0.6628	0.2256	0.1333
y	0.3271	0.6471	0.0595	0.3271	0.6637	0.0613
z	0.0320	0.1111	0.8045	0.0101	0.1107	0.8205

표 5. 동일한 휘도값을 갖는 기준 백색을 촬영한 카메라 출력비

Table 5. Ratio of camera output for reference white patch having same luminance.

	Reference white coordinates			RatioCamera output(linearized)			Ratio		
	x	y	Y	R	G	B	$\frac{R}{R_{D65}}$	$\frac{G}{G_{D65}}$	$\frac{B}{B_{D65}}$
$D_{65}$	0.313	0.329	40.0	102	103	102	1	1	1
5800K	0.333	0.322	40.0	83	84	84	0.826	0.826	0.826
3200K	0.428	0.374	40.0	71	73	73	0.712	0.712	0.712
A	0.488	0.407	40.0	87	85	87	0.823	0.850	0.850

런스 된 카메라 출력 RGB 값들 사이의 비를 표 5에 나타내었다.

앞서 구한 채널 이득과 인광체 좌표, 그리고 상기의 카메라 출력 비를 모두 고려하여 다른 화이트 밸런스로 맞춰진 카메라의 3x3 변환 행렬을 추정하였다.  $M_{RGB}$ 로 구한 인광체 좌표를 이용하여 추정한 변환 행렬  $M_{RGB\_5800K}$ ,  $M_{RGB\_3200K}$ , 그리고  $M_{RGB\_A}$ 와,  $M_{GIM}$ 로 인광체 좌표를 구해서 추정한 변환 행렬  $M_{GIM\_5800K}$ ,  $M_{GIM\_3200K}$ , 그리고  $M_{GIM\_A}$ 를 표 6에 나타내었다.

추정된 행렬의 성능 평가를 위해 시험색을 측정된 좌표값과 카메라 출력 RGB 값으로부터 추정된 행렬 ( $M_{RGB\_t}$ ,  $M_{GIM\_t}$  : t는 5800 K, 3200 K, 및 A)을 이용하여 계산한 자극치로부터 얻어진 xy 좌표값을 비교하였

표 6.  $M_{RGB}$ 와  $M_{GIM}$ 으로 추정한 표준 인광체 좌표를 이용하여 각 기준 백색에 대하여 추정한 변환 행렬

Table 6. Estimated transfer matrix under each reference white using chromaticity coordinates of phosphor primaries obtained by  $M_{RGB}$  and  $M_{GIM}$ .

Reference white	By phosphor primaries obtained by $M_{RGB}$	By phosphor primaries obtained by $M_{GIM}$
5800 K	[0.8014 0.2706 0.1918 0.4089 0.7241 0.0838 0.0400 0.1244 1.1337]	[0.6727 0.2022 0.1593 0.3319 0.5948 0.0733 0.0103 0.0993 0.9619]
3200 K	[1.2587 0.2728 0.0940 0.6423 0.7301 0.0411 0.0628 0.1254 0.5559]	[0.8948 0.1788 0.0709 0.4415 0.5259 0.0326 0.0137 0.0878 0.4280]
A	[1.0122 0.2463 0.0438 0.5165 0.6592 0.0191 0.0505 0.1132 0.2587]	[1.0264 0.2264 0.0489 0.5065 0.6660 0.0225 0.0157 0.1111 0.2955]

표 7. 기존의 방법과 제안 방법으로 구한 변환 행렬로 얻어진 자극치들의 오차 비교

Table 7. Chromaticity errors of tristimulus obtained by original method and proposed method.

Reference white	Estimated transfer matrix	$x_m - x_c$	$y_m - y_c$	$\Delta E_{xy}$	$\Delta E_{uv}^*$
5800K	$M_{RGB}$	0.0076	0.0043	0.0097	6.84
	$M_{RGB\_5800K}$	0.0059	0.0043	0.0080	5.22
	$M_{GIM}$	0.0066	0.0053	0.0091	6.74
3200K	$M_{GIM\_5800K}$	0.0096	0.0050	0.0117	5.22
	$M_{RGB}$	0.0098	0.0100	0.0150	10.2
	$M_{RGB\_3200K}$	0.0082	0.0075	0.0122	10.5
A	$M_{GIM}$	0.0091	0.0063	0.0119	7.74
	$M_{GIM\_3200K}$	0.0137	0.0087	0.0173	7.27
	$M_{RGB}$	0.0082	0.0104	0.0143	9.07
	$M_{RGB\_A}$	0.0152	0.0124	0.0177	11.3
	$M_{GIM}$	0.0079	0.0059	0.0108	18.8
	$M_{GIM\_A}$	0.0115	0.0094	0.0166	7.33

다. 또한 각각의 기준 백색에 대해 화이트 밸런스 된 카메라로 실험적으로 구한  $M_{RGB}$ 와  $M_{GIM}$ 에 대해서도 동일한 계산을 하여 좌표값을 비교하였다. 실험에 이용된 시험색 중 일부 색에 대한 결과를 그림 4에 나타내었다.

그림에서 볼 수 있듯이 제안한 방법으로 추정한 다른 화이트 밸런스의 카메라 3×3 변환 행렬은 실제 실험적으로 구한 변환 행렬보다 더 나은 성능을 갖는다.

수치적 성능 비교를 위해  $xy$  좌표상의 rms 오차와 식 (9)를 이용하여 구한  $L^*u^*v^*$  좌표계상의 오차를 표 7에서 나타내었다.

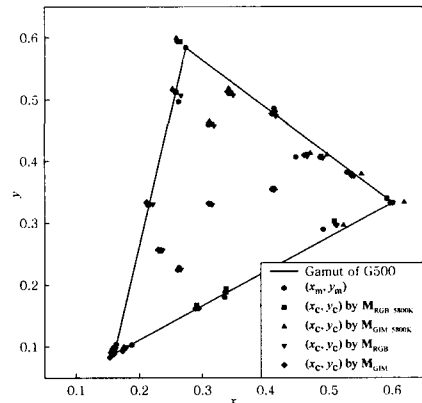
실험 결과 5800 K의 경우 세 가지 색을 이용한 변환 행렬로부터 인광체 좌표를 구하여 변환 행렬을 추정했을 때, 기존의 방법으로 구한 변환 행렬에 대한  $\Delta E_{xy}$  오차가 0.0097인데 반하여, 추정 변환 행렬에 대한 오차는 0.0080으로 줄어들음을 확인하였다. 또한 인광체 추정 시 이용되는 변환 행렬은 모든 색을 이용하여 구한 변환 행렬보다 red, green, 그리고 blue의 세 가지 색을 이용하여 구한 변환 행렬이 더 효과적임을 확인하였다.

**V. 결 론**

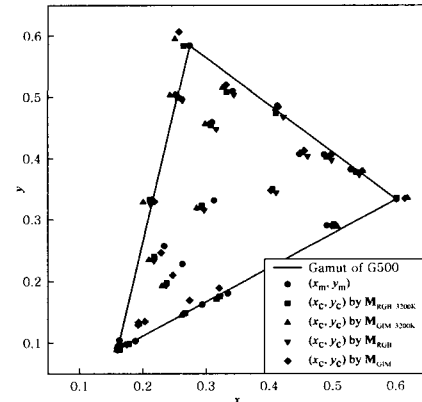
본 논문에서는 다항 회귀법을 이용한 최소 제곱 다항식 모델링으로 특정 기준 백색에 화이트 밸런스 된 카메라 변환 행렬을 구하여 화이트 밸런스가 변했을 경우의 카메라 변환 행렬을 추정하는 방법을 제안하였다.

제안 방법에서는 먼저 다항식 모델링을 이용하여 특정 화이트 밸런스에서의 카메라 변환 행렬을 구하였다. 다음으로 이 변환 행렬로부터 카메라의 표준 인광체 좌표를 추정하였다. 마지막으로 구하고자 하는 기준 백색에 따른 채널 이득을 계산하여 그 기준 백색에 화이트 밸런스 된 카메라의 변환 행렬을 구하였다.

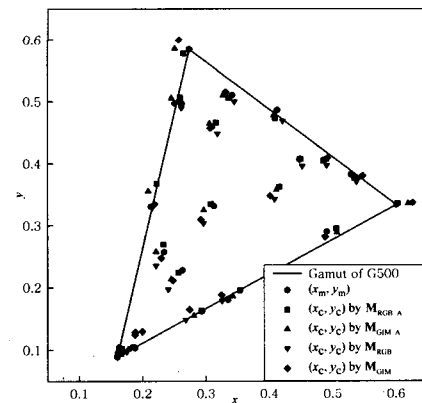
실험 결과 5800 K의 경우 세 가지 색을 이용한 변환 행렬로부터 인광체 좌표를 구하여 변환 행렬을 추정했을 때, 기존의 방법으로 구한 변환 행렬에 대한 오차가 0.0097인데 반하여 추정 변환 행렬에 대한 오차는 0.0080으로 줄어들음을 확인하였다. 좌표상의 오차 값을 비교하였을 때 제안한 방법은 카메라 화이트 밸런스가 달라질 때 마다 모든 시험색을 촬영하여 구하는 변환 행렬과 비슷한 성능의 행렬을 손쉽게 구할 수 있는 장점을 가진다. 금후 과제로는 최소 제곱 다항식 모델링으로 구한 카메라 변환 행렬이 3×3 행렬 보다 3×11 행렬이 더 나은 성능을 가지므로 3×11 변환 행렬에 제안한 방법을 적용하는 연구가 필요하다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. 측정된  $xy$  좌표값과 각각의 변환 행렬로 계산한  $xy$  좌표값: (a) 5800 K; (b) 3200 K; (c) A  
 Fig. 4. The measured  $xy$  coordinates and the calculated  $xy$  coordinates: (a) A; (b) 5800 K; (c) 3200 K.

**참 고 문 헌**

[1] G. Hong, M.R. Luo, and P.A. Rhodes, "A study of digital camera colorimetric characterization

- based on polynomial modeling," *J. of Color Research and Application*, vol. 26, no. 1, pp. 76-84, Feb. 2001.
- [2] G. Wyszecki and W.S. Stiles, *Color Science*, John Wiley & Sons, New York, 1982, pp. 117-169.
- [3] K.B. Benson and J.C. Whitaker, *Television Engineering Handbook*, McGraw-Hill, 1992, pp. 2.3-2.47.
- [4] 권용대, "조명에 따른 디스플레이 대응색 재현 모델," *경북대학교 전자공학과 박사학위논문*, 2001년 12월.
- [5] 최덕규, "시각계 색 순응을 고려한 텔레비전 수상기에서의 색 재현," *경북대학교 전자공학과 박사학위논문*, 1997년 6월.
- [6] I.C. Abrahams, "Analysis of color errors in color television cameras," *J. of SMPTE*, vol. 72, no. 8, Aug. 1963.
- [7] P.C. Hung, "Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up tables model and interpolations," *J. of Electronic Imaging*, vol. 2, pp. 53-61, Jan. 1993.
- [8] P.C. Hung, "Colorimetric calibration for scanners and media," *Proc. SPIE*, vol. 1448, pp. 164-174, Feb. 1991.
- [9] H.R. Kang, "Colour scanner calibration," *J. of Imaging Science and Technology*, vol. 36, pp. 162-170, Mar./Apr. 1992.
- [10] H.R. Kang and P.G. Anderson, "Neural network application to the colour scanner and printer calibration," *J. of Electronic Imaging*, vol. 1, pp. 125-134, Apr. 1992.
- [11] The ANSI Accredited Standards Committee IT8, "Graphic technology- Color reflection target for input scanner calibration," *American National Standards Institute*, 1999.
- [12] J. Park, K. Park, "Professional colour communicator - the definitive colour selector," *J. of the Society of Dyers and Colourist*, vol. 111, pp. 56-57, 1995.
- [13] 정재순, 홍석진, *텔레비전 카메라와 영상 신호의 기초*, 한국번역출판사, 1996, pp. 133-134

저 자 소 개



김 은 수(정회원)  
제 37권 SP편 제 6호 참조



한 찬 호(정회원)  
제 37권 SP편 제 6호 참조



박 종 선(정회원)  
2001년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
2003년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
2003년 1월~현재 LG전자 영상 제품연구소 근무

<주관심 분야: 색 공학, 비디오 공학, TV 시스템>



송 규 익(정회원)  
제 37권 SP편 제 6호 참조



장 수 욱(학생회원)  
1995년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
1995년 2월~2000년 3월 현대자동차 중앙연구소 연구원  
2002년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2002년 3월~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정

<주관심 분야: 영상신호처리, HDTV 신호처리, 자동차 공학>